УДК 539.4.013

НЕКРУГЛІСТЬ ТРУБ. РОЗРАХУНОК ДОДАТКОВИХ НАПРУЖЕНЬ ВІД ВНУТРІШНЬОГО ТИСКУ

І. В. Ориняк, І. В. Лохман, В. В. Стипура, А. В. Богдан, С. О. Охрімчук

Киев, Украина

Обговорюються недоліки існуючих в стандартах процедур визначення некруглості форми поперечного перерізу труб. Запропоновані ефективні методи первинної обробки даних, які зокрема враховують наявність всіх трьох видів відхилення форми від ідеальної. Даються практичні формули для визначення додаткових згинальних напружень від дефектів форми в результаті дії внутрішнього тиску.

Ключові слова: труба, некруглість, напруження

Обсуждаются недостатки существующих в стандартах процедур определения некруглости формы поперечного перереза труб. Предложенные эффективные методы первичной обработки данных, которые в частности учитывают наличие всех трех видов отклонения формы от идеальной. Даются практические формулы для определения дополнительных гибочных напряжений от дефектов формы в результате действия внутреннего давления.

Ключевые слова: труба, некруглость, напряжение

The lacks of existing in standards procedures of determination of change of form of transversal cut of pipes come into question in the article. Offered effective methods of roughing-out of data that in particular take into account a presence all three types of rejection of form from ideal. Practical formulas are given for determination of additional bending tensions from the defects of form as a result of action of intrinsic pressure.

Keywords: pipe, inequality, tension

Вступ. Відмови конструкцій, чи навіть їх руйнування при експлуатації дуже часто пов’язані з наявністю певних силових чинників, граничних станів, механізмів пошкоджуваності, що не були передбачені при проектуванні конструкції. Їх виявлення має приводити в кінцевому випадку до відповідної зміни в нормах на проектування, (далі – НП). Так було завжди, тому відмови є за суттю рушійною силою в розвитку вимог та критеріїв проектування. На жаль, останнім часом в Україні цей зворотній зв'язок між потребами експлуатації та якістю проектування втрачений, що, зокрема, проявляється в відсутності модифікацій НП уже протягом довгого часу.

Частковим пом’якшенням даної ситуації є розробка так званих документів відповідності за призначенням (Fitness for service), (далі – ВЗП), де розглядаються граничні стани пов’язані з наявністю різного роду дефектів форми конструкції, дефектів металу, а також проблеми, що відносяться до деградації характеристик металу в процесі експлуатації. Найбільш авторитетним документом такого плану є американський стандарт API 579 [1], який є фактично доповненням до інших американських стандартів на проектування, розроблених товариством ASME та використовує базові поняття та критерії останніх.

В Україні також є приклади створення документів ВЗП [2]. Проте суттєві недоліки НП (які є фундаментом для ВЗП) не дозволяють обґрунтувати критерії граничного стану. Так, наприклад, для магістральних трубопроводів діючим є СНиП 1985 року [3]. В цих нормах взагалі для труб розглядаються тільки рівномірні по товщині напруження, тобто, зокрема, відсутнє поняття оболонкових (лінійно змінних по товщині стінки труби) напружень. Разом з тим, труба дуже часто працює як оболонка (локальні пригрузи, відхилення форми). І якщо розрахунок таких додаткових напружень не представляє принципових складностей, то їх допустима величина зовсім не регламентується НП [3]. Вибір в такій якості допустимих напружень від тиску може призвести до ситуації, коли цілі ділянки трубопроводів, де тиск дорівнює проектному і діють хоч які малі додаткові оболонкові напруження (а вони завжди є), будуть формально не задовольняти умовам міцності. Зауважимо, що саме тому, в нормах ASME встановлюються різні допустимі напруження

для звичайних (мембранних) напружень і для їх суми разом з оболонковими (більша допустима величина) напруженнями [4].

Одна з найбільш гострих проблем експлуатації МГ України є виникнення та розвиток стрес-корозійних тріщин. Для магістральних трубопроводів диаметром 1420мм проблема стоїть особливо гостро, так як по цій причині відбувся ряд аварій, зокрема на газопроводі Уренгой-Помари-Ужгород. Ряду аварій вдалося запобігти завдяки проведенню заходів з технічної діагностики. Дефектні ділянки було замінено, однак, до цього часу існує ряд неясностей щодо всіх причин розвитку пошкодження газопроводу саме в цих місцях.

Лабораторні дослідження показують надзвичайно суттєву роль величини напружень і їх циклічних складових на швидкість росту таких дефектів [5]. Статистика спостережень реальних трубопровідних систем показує, що густина наявності суттєвих колоній стресс-корозійних тріщин значно зростає з величиною номінальних напружень від тиску, причому пороговим значенням напруження виникнення тріщин є величина 65% границі текучості [6]. Разом з тим, в цій же роботі відзначається, що вказана величина напружень є оцінкою знизу для величини напружень, адже на трубопровід можуть діяти інші крім тиску силові фактори [6]. Це підтверджується результатами лабораторних випробувань, у яких зародження стрес-корозійних тріщин починає спостерігатися при рівнях напружень близьких до границі текучості [7,8]. Все це свідчить про те, що на труби можуть діяти значно більші колові напруження, σ_θ , ніж тільки напруження від тиску

$$\sigma_\theta = PR/t,$$

де P - тиск, R - радіус, t - товщина стінки труби.

Зауважимо, що мова йде не про осьові напруження, які можуть бути непрогнозовано великими в результаті складних геотермічних умов, а саме про колові. Єдиною можливою причиною їх виникнення для прямолінійних підземних ділянок в щільних ґрунтах, у яких відсутні різного роду дефекти товщини стінки, є так звана некруглість форми труби (в термінології API 579 "out-of-roundness"). Для практичних розрахунків вважається, що при «некруглості» форма труби не змінюється в поздовжньому напрямку [1]. Вважаємо, що саме некруглість може бути основною причиною виникнення тріщин і руйнувань. Так в кінці 90-х років минулого століття в Англії відбулось декілька масштабних руйнувань котлів, причиною яких були кутові відхилення зварного поздовжнього шва. Це, зокрема, привело до створенню під егідою Федерації оцінки безпеки (Великобританія), що займається контролем і сертифікацією виробництва відповідного нормативного документу що регламентує порядок вимірювання і оцінки таких дефектів [9].

Аналіз вітчизняних та зарубіжних нормативних документів, що регламентують якість виробництва труб, показав, що між ними існують певні розбіжності.. Найбільш детально вимоги до геометричних параметрів поперечного перерізу труб представлено в американському стандарті API 5L [10], де передбачається розглядати наступні дефекти форми:

- різницю величини діаметра від стандартного значення;
- відхилення форми поперечного січення типу «овальність»;
- зміщення кромок поздовжнього шва;
- кутове відхилення форми поздовжнього шва.

При цьому стандарт ВЗП API 579 [1] дає більш детальну трактовку некруглості форми, яку пропонується розглядати як певну функцію кутової координати. З цією метою в стандарті пропонується як а) методика виміру, так і б) методика аналізу напруженого стану при дії тиску. Оскільки документ є найбільш популярним в світі і використовується також і в країнах СНД, то маємо вказати на його недоліки:

Недоліком вимірювання є те, що методика базується на даних вимірювань радіус-вектора, отриманих від загалом довільної внутрішньої точки, але дає неправильний спосіб находження центральної точки отриманої фігури. Тому подальший розклад скоректованих точок відносно найденого центру в ряд Фур'є є некоректним. Крім того, нічого не говориться про те, як врахувати при цьому кутові відхилення і зміщення кромок, адже вони також впливають на загальну деформацію кола. Іншими словами, неможливо задати лише точкові відхилення, маючи при цьому в усіх інших точках ідеальну кругову форму.

Методики аналізу напруженого стану від дії тиску для кутового відхилення некоректні. Наявність двох принципово різних методик для локального і глобального кутового відхилення, при практичній і ідеологічній неможливості розрізнити їх на практиці також призводить

користувачів до сум'яття. Крім того, в жодній з них не використовується сама величина кутового стрибка, а використовуються величини відхилень радіуса-вектора, що неправильно. Зокрема, для локального стрибка кутів приводиться процедура розкладу в нескінчений ряд Фур'є (на практиці пропонується обмежитися 100 членами), що і некоректно і непрактично.

Мета роботи випливає з описаного вище і полягає в усуненні недоліків документу API 579 [1]. Тобто, в роботі будуть обговорюватися як питання коректного визначення і аналітичного опису геометрії, так як врахування неточностей форми (осьова і кутова не співвісність та неперервна кривизна), особливо при одночасній наявності. Зауважимо, що в даній роботі ми зовсім не торкаємося проблеми неточностей вимірювань. В цілому ідеологія її рішення сформульована [11], проте необхідно довершити деталі.

Принцип вимірювання положення точок контуру та їх аналітичний опис. 2.1. Опишемо і проілюструємо процедуру первинної обробки вимірювань форми труби (січення). В документі API 579 [1] дається відповідний малюнок, відтворений тут на рис 1. Вважається, що всередині труби вибирається якийсь довільний центр відліку (точка O_1 на рис 1) і початковий промінь (лінія O_1, A_0 на рис 1), відносно якого вимірюються кут. Далі визначаються радіальні положення (радіуси $R_i(\theta_i)$, тобто відстані від точки O_1) послідовного набору точок A_0, A_1, $A_2 \ldots A_N$, розташованих через рівні проміжки кута $\Delta\theta = 2\pi / N$, тобто кожна точка A_i має кутову координату $\theta_i = i \cdot \Delta\theta$, причому $A_0 = A_N$. Забігаючи наперед, вкажемо, що вказаний спосіб збору первинних даних найбільш легко реалізується на практиці.

Проблеми починаються з находження уточненого реального центру січення. В тексті документу говориться, що точки виміру повинні бути рівномірно розподілені (evenly spaced intervals) по контуру січення. Проте рівномірність інтервалів по куту автоматично не означає рівномірність інтервалів по довжині контуру. Покажемо це на прикладі. Нехай маємо січення ідеально кругової форми радіуса 1. Проте з зрозумілих причин центр відліку зміщений на величину ε. Рівняння січення, яке ми міряємо, має вигляд:

$$x^2 + (y + \varepsilon)^2 = 1 \tag{1}$$

Згенеруємо чисельно N точок контуру, розташованих на променях, з інтервалом $\Delta\theta = 2\pi / N$ і визначимо набір значень $R_i(\theta_i)$. Визначимо уточнене рівняння контуру в формі [1]:

$$R(\theta) = R_m + A_1 \cos\theta + B_1 \sin\theta + \Delta R(\theta), \tag{2а}$$

де R_m – середнє (розрахункове) значення радіусу, A_1 та B_1 – це зміщення центру по осях *x* та *y* відповідно, $\Delta R(\theta)$ додаткові відхилення від ідеальної форми. В документі [1] даються наступні рівняння для визначення

$$R_m = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} R_i(\theta_i) \quad A_1 = \frac{2}{N}\sum_{i=1}^{N} R_i(\theta_i)\cos\theta_i \quad B_1 = \frac{2}{N}\sum_{i=1}^{N} R_i(\theta_i)\sin\theta_i \tag{2б}$$

Додаткові відхилення $\Delta R(\theta)$ і є, по суті, відхиленнями форми, що визивають додаткові напруження, і також представляються рядом, як і (2б):

$$A_k = \frac{2}{N}\sum_{i=1}^{N} \Delta R_i(\theta_i)\cos k\theta_i \quad B_k = \frac{2}{N}\sum_{i=1}^{N} \Delta R_i(\theta_i)\sin k\theta_i, \; k = 2,3 \ldots K \tag{2в}$$

В таблиці 1 представлені дані визначення значень R_m та A_k, адже $B_k \equiv 0$ в силу симетрії контуру (1) відносно осі ординат.

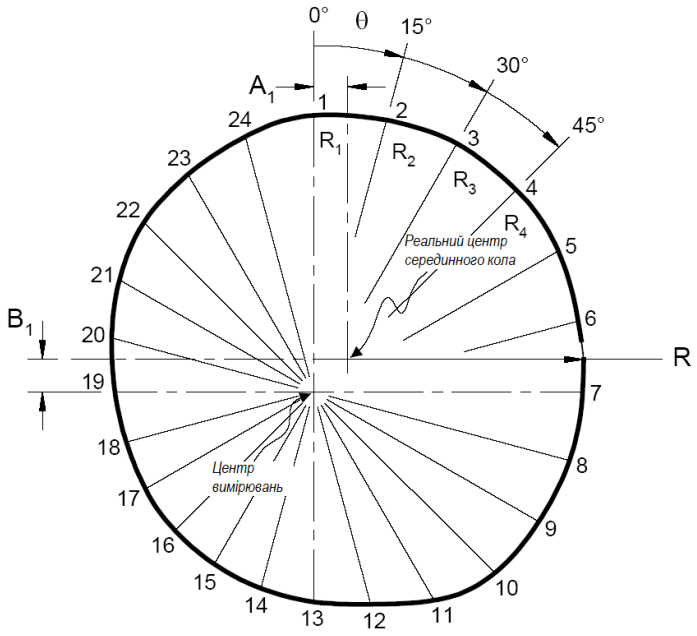

Рисунок 1 – Метод вимірювання некруглості форми поперечного перерізу трубопроводу згідно API 579 [1]

Таблиця 1 – Результати обчислення по API 579 [1] коефіцієнтів форми кола одиничного радіуса при зміщенні від його центру точки вимірювань

Δ	R_m	A_2	A_4
0	1	0	0
0,02	0.9999	-1.00e-04	-2.50e-09
0,05	0.999375	-6.25e-04	-9.78e-08
0,07	0.998774	-1.23e-03	-3.77e-07
0,1	0.997495	-2.51e-03	-1.57e-06
0,12	0.99639	-3.61e-03	-3.28e-06
0,15	0.994351	-5.66e-03	-8.05e-06
0,2	0.989924	-1.01e-02	-2.58e-05
0,25	0.984187	-1.59e-02	-6.40e-05

Цей чисельний експеримент наочно демонструє недоліки процедури оброблення первинних даних замірів форми контуру. Ненульові значення A_k при $k \geq 2$ формально в наступній процедурі розрахунку будуть давати додаткові напруження, яких фактично немає. Очевидно, що зі збільшенням похибки вибору початкового центру вимірювань збільшуються і похибки визначення відхилення форми і відповідні їм напруження. Ці уявні напруження можуть бути достатньо великими, щоб ввести в оману і прийняти технічно неправильне рішення.

2.2. Причиною похибки, як ми вказували вище, є те, що рівномірне розташування точок виміру *по куту* не означає їх рівномірний розподіл по довжині контуру. Можна запропонувати два, на перший погляд очевидні, технічні уточнення процедури виміру:

- технічно відцентрувати розміщення початкового центру відліку (чим менше ε , тим точніші результати) за допомогою початкових певних вимірювань обмеженого числа точок;

- розміщувати точки виміру через одинакові *по довжині* інтервали. Для розглянутої задачі ідеальної проте зміщеної геометрії вони можуть бути ефективними, хоча і приводять до додаткових затрат часу і ускладнень технічних. Однак для складних геометрій контуру, вони можуть стати просто незрозумілими (що таке центр складної замкнутої фігури, як визначати довжину інтервалу, тощо).

Єдиний вихід полягає в тому, щоб не ускладнюючи процедуру вимірювань, запропонувати ефективну математику обробки даних, повністю узгоджену з процедурою подальших розрахунків напруженого стану. Суть її є наступною:

1. Проводиться збір первинної інформації, як в описаній вище процедурі по API 579, що дає набір значень $R_i(\theta_i)$.

2. Проводиться первинна чорнова обробка даних в вигляді розкладу в ряд Фур'є по кутовій координаті до 10-12 членів розкладу. Ця допоміжна процедура має на меті лише одне – згладжування можливих похибок при визначенні довжини кожного елементарного інтервалу (між точками виміру). Як ми вказували в вступі, детальне обґрунтування процедури згладжування в залежності від похибки вимірювань ще чекає на своє вирішення.

3. Визначаються довжини елементарних ділянок, Δl_i, між точками замірів i та $i+1$. Для цього замість реальних (виміряних) значень $R_i(\theta_i)$ в точках виміру використовуються розраховані в п.2 уточнені теоретичні значення $\overline{R}_i(\theta_i)$ по розкладу Фур'є. Елементарні довжини рахуються так:

$$\Delta l_i = \sqrt{\left(\overline{R}_i(\theta_i)\right)^2 \cdot \left(\Delta\theta\right)^2 + \left(\overline{R}_{i+1}(\theta_{i+1}) - \overline{R}_i(\theta_i)\right)^2} \tag{3}$$

Ще раз укажемо, що при абсолютно точному вимірюванні в формулі (3) ми б використовували реальні дані замірів положень точок, а не згладжені по п. 2. Важливість процедури згладжування зростає зі зростанням кількості точок виміру, коли Δl_i стає співставним зі значенням похибки виміру.

4. Находиться повна довжина контуру січення, L, координата середини кожної елементарної ділянки, l_i, та середнє значення радіуса на цій ділянці $\widehat{R}_i$:

$$L = \sum_{i=1}^{N} \Delta l_i \qquad l_i = \sum_{m=1}^{i-1} \Delta l_m + \Delta l_i / 2 \qquad \widehat{R}_i = \left(R_{i+1} + R_i\right)/2 \tag{4}$$

Зауважимо, що в останній формулі (4) використовуються «правильні», тобто виміряні значення $R_i(\theta_i)$.

5. Визначається коефіцієнти «правильного» розкладу

$$\widehat{R}_m = \frac{1}{L}\sum_{i=1}^{N} \widehat{R}_i(\theta_i)\Delta l_i \tag{5а}$$

як середнє значення радіусу труби, та

$$\widehat{A}_k = \frac{2}{L}\sum_{i=1}^{N} \widehat{R}_i(\theta_i)\cos\left(kl_i / L\right)\Delta l_i, \quad \widehat{B}_k = \frac{2}{L}\sum_{i=1}^{N} \widehat{R}_i(\theta_i)\sin\left(kl_i / L\right)\Delta l_i, \quad k = 1,2,3...\widehat{K} \tag{5б}$$

як коефіцієнти розкладу в ряд Фур'є. Зауважимо, що коефіцієнти при $k=1$ описують не зміну форми, а лише зміщення січення як цілого.

Найпростіша перевірка запропонованої процедури проводиться на указаному в п. 2.1. штучно згенерованому тесті для ідеального поперечного січення (1). Результати ми не представляємо, бо вони прогнозовані і дають ідеальне співпадіння отриманої форми з (1) при всіх розглянутих $\varepsilon \le 0.4$. Таким чином, процедура успішно пройшла тест для ідеальної геометрії.

2.3. Більш складною є проблема одночасного вимірювання всіх трьох складових неправильності геометрії – розглянутого вище неперервного відхилення, що, зокрема може бути описаним рядом Фур'є, та кутової і осьової не співвісностей. Складності полягають в наступному:

- спроби описати геометрію зі стрибками рядом Фур'є є неправильним, адже такий ряд принципово не може дати правильні значення стрибків функцій, а також похідних цих функцій в околі особливих точок. Зауважимо, що пошукові додаткові напруження від тиску залежать від другої похідної від форми.

- вимірювання стрибків кутів і переміщень звичайно відбувається за допомогою інших технічних засобів [1, 9]. При цьому труба чи оболонка можуть мати і неперервні (по Фур'є)

неправильності форми, що вимірюються по процедурі 2.1. Як сумістити ці різні вимірювання? Більше того, стрибки кута і переміщень в певних точках не можуть бути самі по собі без подальшого неперервного по Фур'є викривлення геометрії, адже в такому разі контур не замкнеться!

В нашій роботі [12] по суті сформульовано поняття стрибка переміщення чи кута. Це по-перше, сам стрибок, а по-друге певне неперервне відхилення геометрії, яке дозволяє контуру замкнутися в точці відхилення. Таким чином,

Для стрибка переміщень:

вводиться поняття самого стрибка, d , (див рис. 2) , а також відповідні йому неперервні переміщення і кривизни

$$w = \vec{R}_d = \frac{d}{2\pi}\left(\varphi\cos\varphi - \sin\varphi\right),\ \varphi = 2\pi l / L\,. \qquad (6^a)$$

або вводячи для зручності безрозмірну функцію $\vec{r}_d(l)$

$$\vec{R}_d = d\cdot\vec{r}_d(l) \qquad (6^б)$$

Для стрибка кутів:

вводиться поняття самого стрибка кута ψ , а також відповідні йому неперервні переміщення і кривизни (дати формулу)

$$w = \vec{R}_\psi = \psi R_0\left(\sin\varphi + \frac{2}{\pi}\left(1-\cos\varphi - \frac{\varphi\sin\varphi}{2}\right) - \frac{3}{\pi}\left(1-\cos\varphi\right)\right),\ \varphi = \frac{l}{L}2\pi\,. \qquad (7^a)$$

або аналогічно

$$\vec{R}_\psi = \psi\cdot\vec{r}_\psi(l) \qquad (7^б)$$

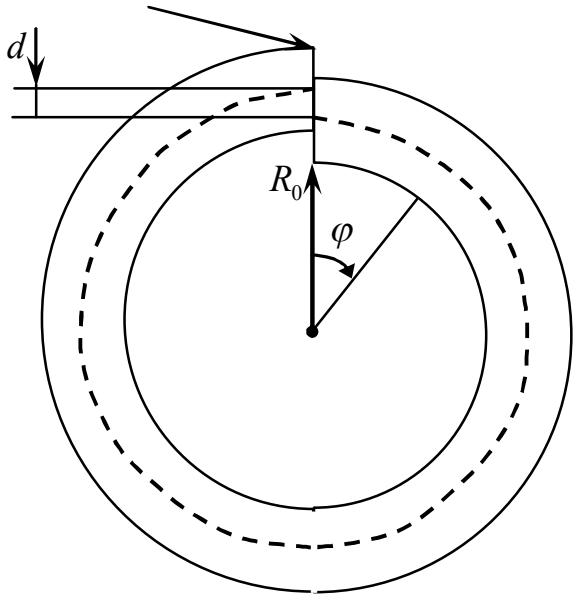

Рисунок 2 – Стрибок переміщень

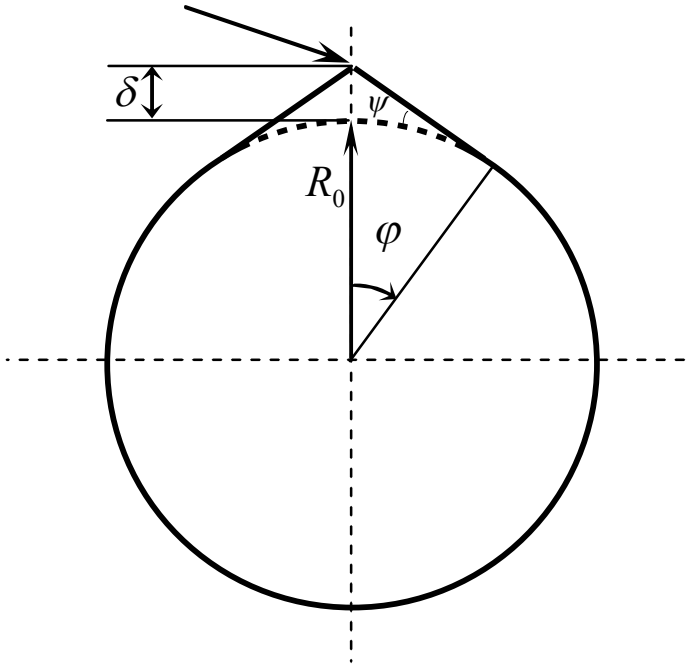

Рисунок 3 – Стрибок кутів

2.4. В залежності від технічного способу одночасного вимірювання неперервних та стрибкоподібних відхилень є два шляхи вирішення проблеми їх врахування.

2.4.1. Окремо вимірюються положення точок $R_i(\theta_i)$, і за допомогою інших засобів однозначно визначається стрибки переміщень, d, і кута ψ.

Для точок $R_i(\theta_i)$ по процедурі п. 2.2. проводиться первинна обробка даних, визначаються елементарні довжини (3), повна довжина, координати середин ділянок та їх середні радіуси. Середні значення радіуса на кожній ділянці $\widehat{R}_i$ уточнюються з врахуванням уже врахованих переміщень від стрибків:

$$\widehat{R}_{i,cor}(l_i) = \widehat{R}_i(l_i) - d \cdot \vec{r}_d(l_i) - \psi \cdot \vec{r}_\psi(l_i) \tag{8}$$

Скоректовані середні значення радіусів, $\widehat{R}_{i,cor}(l_i)$, є неперервними по Фур'є і можуть бути представлені в вигляді ряду Фур'є (5).

2.4.2. Вимірюються положення точок $R_i(\theta_i)$, і задача полягає в виділенні з цього масиву точок стрибків кута та переміщень і неперервної складової.

Для точок $R_i(\theta_i)$ по процедурі п. 2.2. проводиться первинна обробка даних, визначаються елементарні довжини (3), повна довжина, координати середин ділянок та їх середні радіуси $\widehat{R}_i(l_i)$.

Складається функціонал:

$$\sum_{i=1}^{N}\left(\widehat{R}_i(l_i) - d \cdot \vec{r}_d(l_i) - \psi \cdot \vec{r}_\psi(l_i)\right)^2 = \min \tag{9}$$

Методом найменших квадратів, мінімізуючи похибку, знаходять значення d, ψ. Дальше по формулі (8) знаходиться неперервна по Фур'є послідовність точок, яку розкладаємо в ряд (5) та находимо коефіцієнти ряду.

Розрахунок напружень. Детально методика розрахунку і її обґрунтування описані в статті [12]. В ній на відміну широко представлених в літературі рішень для спрощеної системи диференційних 2-го порядку, на основі лінеаризованого загального рішення 6 диференційних рівнянь [13], приводяться точні результати для дефектів трьох видів. В цій статті приведемо основні формули для додаткових напружень. Зауважимо, що в загальному випадку наявності відхилень трьох видів необхідно просумувати всі компоненти напружень.

3.1. Неперервні по Фур'є відхилення форми:

Напруження даються наступною формулою:

$$\sigma(\varphi) = -\frac{pR_0}{t}\sum_{n=2} 6\frac{R_0}{t}\left(a_n \cos n\varphi + b_n \sin n\varphi\right), \tag{10}$$

де $a_n = \frac{(n^2-1)A_n}{n^2-\mu^2}$; $b_n = \frac{(n^2-1)B_n}{n^2-\mu^2}$; $\mu = \sqrt{\left|1-\frac{pR_0^3}{E'J}\right|}$; $E' = \frac{E}{1-\nu^2}$; ν – коефіцієнт Пуассона.

Тоді, якщо, наприклад, $R(\varphi) = R_m + A_2\cos 2\varphi$, то максимальні додаткові напруження визначаються за допомогою виразу

$$\sigma = -\frac{pR_0}{t}6\left(\frac{3}{4-\mu^2}\right)\frac{R_0 A_2}{t}. \tag{11}$$

З (11) можна отримати, що при зростання внутрішнього тиску максимальні додаткові напруження прямують до певної асимптотичної величини:

$$\sigma_{as} = 1{,}5E\frac{tA_2}{R_0}, \tag{12}$$

яка не залежить від величини прикладеного внутрішнього тиску. Слід відзначити, що з (12) та даних табл. 1 випливає, що для трубопроводу з радіусом $R_0 = 0{,}71м$, товщиною стінки $t = 0{,}0157м$, модулем Юнга $E = 2\cdot 10^5 МПа$ рівень фіктивних напружень при застосуванні методики вимірювань, представленої в API 579, наприклад, при $\Delta = 0{,}2$ може досягати 66МПа.

3.2. Кутова неспіввісність:

$$\sigma_\psi = \frac{pR_0}{t}6\frac{\psi R_0}{t}\left(\frac{\sin\mu\varphi}{\mu} - ctg\,\mu\pi\frac{\cos\mu\varphi}{\mu} + \frac{2}{\pi\left(1-\mu^2\right)}\cos\varphi - \frac{1}{\pi\mu^2}\right),$$

$$\text{якщо } 1-\frac{pR_0^3}{E'J} > 0; \tag{13а}$$

$$\sigma_\psi = \frac{pR_0}{t}6\frac{\psi R_0}{t}\left(\frac{sh\,\mu\varphi}{\mu} + \frac{2-\mu\pi cth\,\mu\pi}{\mu^2\pi}ch\,\mu\varphi + \frac{2}{\pi\left(1+\mu^2\right)}\cos\varphi - \frac{1}{\pi\mu^2}\right),$$

$$\text{якщо } 1-\frac{pR_0^3}{E'J} < 0. \tag{13б}$$

З (13) випливає, що при зростанні внутрішнього тиску ($p \to +\infty$), або, що те ж саме $\mu \to +\infty$

$$\lim_{\mu\to+\infty}\sigma \to \frac{6E'J}{t^2R_0}\psi\mu = E\frac{t\psi}{2R_0}\mu \tag{14}$$

Формула (14) дуже зручна в застосуванні, адже множник $0.5t\psi / R_0$ характеризує геометрію дефекту, а множник μ - рівень навантаження, що пропорційний $\sqrt{p}$.

Зауважимо, що в стандарті API 579 [1] формули розрахунку є не тільки неправильними, але і досить складними практичному застосуванні.

3.3. Осьова не співвісність:

$$\sigma_d = \frac{pR_0}{t} 3 \frac{d}{t} \left(\left(ctg\mu\pi + \frac{2}{\pi\mu\left(\mu^2 - 1\right)} \right) \sin\mu\varphi - \cos\mu\varphi - \frac{2}{\pi\left(\mu^2 - 1\right)} \sin\varphi \right),$$

$$\text{якщо } 1 - \frac{pR_0^3}{E^{'} J} > 0; \qquad (15^{а})$$

$$\sigma_d = \frac{pR_0}{t} 3 \frac{d}{t} \left(\left(cth\mu\pi - \frac{2}{\pi\mu\left(\mu^2 + 1\right)} \right) sh\mu\varphi - ch\mu\varphi + \frac{2}{\pi\left(\mu^2 + 1\right)} \sin\varphi \right),$$

$$\text{якщо } 1 - \frac{pR_0^3}{E^{'} J} < 0. \qquad (15^{б})$$

Наведені в п 3.1.-3.3. формули дають неперервний розподіл напружень по коловій координаті, і враховують те, що наявність неспіввісностей призводить і до певної неперервної зміни форми, яка тут приймається в фіксованому вигляді (6) та (7).

Висновки. В даній роботі вперше в літературі проблема вимірювань і аналізу неправильностей форми поперечного січення труб вирішена комплексно: в існуючих стандартах не враховується можливість неточного центрування прибору щодо вимірювання положень точок контуру. Тут приведений математично точний підхід, який дозволяє отримати точний опис контуру при будь-якому положення центра вимірювань.

В літературі не існувало не тільки розв'язку, але і постановки задачі про математичний опис контуру, що містить усі можливі відхилення – неперервне, та осьову і кутова неспіввісності. Ми розглядаємо неспіввісності, як такі, що містять і неперервну складову.

Описані прості та ефективні формули визначення додаткового напруженого стану від усіх трьох неправильностей форми. Вказано, що існуючі розв'язки для кутового стрибка форми взагалі некоректні, як некоректна сама диференціація цих дефектів на локальні і глобальні.

В другій частині роботи буде представлено опис принципу дії прибору для вимірювання форми поперечного перерізу трубопроводу та приклади його застосування для вимірювання дефектів форми магістральних газопроводів.

Література

1. API 579. Fitness-for-service. – 2000. – 872p.
2. ДСТУ-Н Б В.2.3-21:2008 Магістральні трубопроводи. Настанова. Визначення залишкової міцності магістральних трубопроводів з дефектами. Мінрегіонбуд. 2008. 68с.
3. СНиП 2.05.06-85. Магистральные трубопроводы. Строительные нормы и правила. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1985. – 52 с.
4. Орыняк И.В., Богдан А.В., Бородий М.В., Розгонюк В.В., Билык С.Ф. Использование категоризации напряжений и деформационных критериев при оценке прочности магистральных трубопроводов // Экотехнологии и ресурсосбережение, 2007, №4. с. 12-23.
5. Красовський А.Я., Лохман И.В., Ориняк И.В. Стресс-коррозионные разрушения магистральных трубопроводов //Проблемы прочности. - №1, 2012.
6. Zheng W., Sutherby R., Revie R.W., Tyson W.R. and Shen G. Stress corrosion cracking of linepipe steels in near-neutral pH environment: a review of effects of stress // Envirpmentally assisted cracking: predictive methods for risk assessment and evaluation of materials, equipment and structures, ASTM STP 1401, R.D. Kane, Ed., American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 2000.

7.Cerny I , Linhart V. An evaluation of the resistance of pipeline steels to initiation and early growth of stress corrosion cracks Engineering Fracture Mechanics 71 (2004) 913–921.

8.Lu B.T., Luo J.L., Norton P.R. Environmentally assisted cracking mechanism of pipeline steel in near-neutral pH groundwater //Corrosion Science 52 (2010) 1787–1795.

9.Guidelines - Shell Boilers - Guidelines for the examination of longitudinal seams of shell boilers// The safety assessment federation SBG 2.

10. API Spec. 5L «Технические условия на трубы для трубопроводов». Издание сорок третье, март 2004 г. Дата введения: 4 октября 2004 г, 168с.

11. Orynyak I.V., Lokhman I.V. The spring splines procedure with prescribed accuracy for determination of the curvatures of the pipeline based on the 3-D measurements of its position // Rio Pipeline Conference & Exposition 2011, IBP1029_11.

12. Ориняк І.В, Лохман І.В., Богдан А.В. Використання моделі кільця для аналізу напружень в трубопроводах з дефектами форми// Машинознавство.

13. Orynyak I.V., Yakovleva Ye.S. Application of the crack compliance method to long axial cracks in pipes with allowance for geometrical nonlinearity and shape imperfections (dents) // Engng. Fract. Mech., 2008, V.75, N14, p.4052-4065.

Стаття надійшла до редакційної колегії
10.06.12
Рекомендована до друку оргкомітетом
міжнародної науково-технічної конференції
***"Проблеми і перспективи транспортування нафти і газу"**,*
яка відбулася 15-18 травня 2012 р.